

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ  
ІМ. Г.Є. ПУХОВА**

**БЕРЕЗКІН Андрій Леонідович**



**УДК 004.942**

**МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ПРИЙОМУ РАДІОСИГНАЛІВ В ТУНЕЛЯХ ШАХТ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України

**Науковий керівник**

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Винничук Степан Дмитрович,**  
Інститут проблем моделювання в енергетиці  
ім. Г.Є. Пухова НАН України,  
завідувач відділу автоматизації проектування  
енергетичних установок

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Гвоздєва Ірина Маратівна,**  
Національний університет "Одеська морська  
академія" МОН України, професор кафедри  
електрообладнання і автоматики суден

кандидат технічних наук  
**Ніколаєнко Богдан Анатолійович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського» МОН України, старший викладач  
кафедри №3 Інститут спеціального зв'язку та  
захисту інформації

Захист відбудеться «15» квітня 2021 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01 Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Генерала Наумова, 15.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Генерала Наумова, 15.

Автореферат розісланий « 12 » березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01



В. В. Душеба

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Тунелі шахт характеризуються складною геометрією поверхонь, що при розповсюдженні радіосигналів зумовлює наявність таких явищ як дифракція, рефракція та інтерференція, що призводить до появи інтермодуляційних завад, явища загасання радіосигналу. Крім того, на цих об'єктах є й інші промислові завади, наприклад, від працюючих електродвигунів, блоків живлення. При багатопробному розповсюдженні радіосигналів в тунелях шахт з ростом відстані від приймача до передавача вклад складової прямолінійного розповсюдження в функцію часу, що описує енергію сигналу в точці, суттєво зменшується. Це може призводити до появи зон, в яких прийом сигналу стає неможливим, якщо не враховувати Допплерівський ефект зміщення частоти.

Одним із етапів створення радіомережі на будь-якому об'єкті є планування радіопокриття. Сучасні програмні засоби радіопланування ґрунтуються на класичних теоріях розповсюдження електромагнітного поля, над якими в свій час працювали такі відомі вчені як Жан Френель, Християн Гюйгенс, Б.О. Введенський, Є.Л. Фейнберг, І.С. Гоноровський, Л.Д. Голдштейн та інші.

На етапі радіопланування стає зрозумілим обсяг необхідного радіообладнання, його розміщення та вимоги до технічних характеристик. При цьому важливо мінімізувати кількість приймальних пристроїв, тобто розміщувати їх на великих відстанях, але таких, при яких забезпечується стійкий прийом сигналу, що можливо при енергії сигналу, яка перевищує мінімально необхідну.

На даний час на промислових підприємствах впроваджуються технології мобільного зв'язку, позиціонування персоналу і транспортних засобів з використанням обладнання різноманітних світових компаній. Це такі компанії як Nanotron (Німеччина), Airspan, Parallel Wireless (Ізраїль), Huainan Wantai Electronic Co. Ltd (Китай), Ericsson (Швеція), Rajant, Baicells Technologies, Semtech Corporation (США).

Обладнання цих компаній використовуються у важких для радіопристроїв умовах функціонування. Гарантована робота радіопристроїв досягається використанням особливих протоколів радіообміну та програмних засобів, що є комерційною таємницею. Системи радіообладнання, пристосовані для роботи в таких важких умовах, виготовляються невеликими серіями, зазвичай є досить вартісними, але в порівнянні з програмною частиною, коштовність апаратної частини не перевищує 30% їх вартості. Наприклад, для обладнання зв'язку, яке коштує 112 тис. доларів США, ціна на ліцензію програмного забезпечення та технічне обслуговування сягає 480 тис. доларів США щорічно. В даних про технічні характеристики таких систем відмічається, що відстань від передавача до приймача може бути в межах до 300 метрів. Тому в практичному плані доцільною є розробка в першу чергу програмних засобів, що дозволять використати їх в існуючих системах обладнання зв'язку при вимогах до дальності передачі не нижче 300 метрів, а також створення передумов для розробки такого обладнання в Україні.

Інформацію щодо проведення подібних досліджень в Україні в доступних літературних джерелах не виявлено. Існуюче в Україні обладнання промислового радіозв'язку та планування його застосування базується на засадах загального

використання засобів радіо, без урахування особливостей розповсюдження радіохвиль в тунелях шахт.

В тунелях шахт при зміні відстані між передавачем та приймачем змінюється величина Допплерівського зміщення частоти, прогнозувати яке складно через те, що геометричні характеристики тунелів можуть суттєво відрізнятися і їх форму в загальному випадку неможливо передбачити. Тому існуючі розробки для антенних систем стосовно діаграм направленості антени не можуть бути використані в умовах тунелів шахт.

В тунелях шахт також має місце багатопроменеве розповсюдження та інтерференційні завади. Для забезпечення надійного прийому «свого» сигналу слід відмежуватися від сторонніх сигналів. Тому виділення «свого» сигналу є ще одним із завдань, що потребують вирішення при створенні програмних засобів, що передбачається розробити.

При розробці програмних засобів з обробки радіосигналів необхідно враховувати можливості їх технічної реалізації. На даний час серед сучасних технологій радіозв'язку треба виділити SDR-технології, на основі яких можливе створення адаптивного панорамного приймача.

Тому актуальним в науковому плані є завдання розробки методів, моделей та програмних засобів для вирішення задач радіопланування, забезпечення ефективного прийому радіосигналів на основі ідентифікації «свого» радіосигналу та оцінки можливостей створення програмних засобів для багатоканального панорамного приймача на засадах SDR-технології, обчислювальна складність якого була б прийнятною для мінікомп'ютера панорамного SDR-приймача.

**Зв'язок програми з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи відповідає основним науковим напрямкам та планам Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова, що пов'язані з науково-дослідними роботами по темі "Розробка методів і засобів багатоканального акустичного моніторингу та оцінки фактичного стану підземних трубопроводів без їх розкриття у експлуатаційних умовах" шифр МОНИТОР та дослідженням і технічним розробкам у рамках НДР ТОВ «Дейта Експрес» пілотного проекту по впровадженню на підприємствах Метінвест та ДЕТЕК технологій мобільного зв'язку, позиціонування персоналу, транспортних засобів, застосування технологій IoT.

**Мета і завдання дослідження.** Мета полягає в розробки методів, моделей та програмних засобів для вирішення задач радіопланування, забезпечення ефективного прийому радіосигналів на основі ідентифікації «свого» радіосигналу та оцінки можливостей створення програмних засобів для багатоканального панорамного приймача на засадах SDR-технології, обчислювальна складність якого була б прийнятною для мінікомп'ютера панорамного SDR-приймача для забезпечення стійкого прийому радіосигналу в умовах тунелів шахт.

Для вирішення поставленого науково-прикладного завдання в дисертації були сформульовані і вирішені наступні завдання:

1. Виконати аналіз методів радіопланування та прийому радіосигналів в умовах тунелів шахт.
2. Визначити складові електромагнітного поля, що є визначальними при описі енергії поля в точці та на їх основі розробити адитивну математичну модель

3. Запропонувати спосіб визначення місця розміщення радіоприймачів при вирішенні завдань радіо планування в тунелях шахт.

4. Запропонувати метод ідентифікації радіосигналів на основі критерію «збігу фазового портрету» з урахуванням Допплерівського зміщення частоти радіосигналу для забезпечення селекції свого радіосигналу.

5. Запропонувати математичну модель оцінки обчислювальної складності процесу ідентифікації «свого» радіосигналу та оцінити можливість створення програмного забезпечення для мінікомп'ютера панорамного SDR-радіоприймача

**Об'єктом дослідження** є процеси розповсюдження і прийому радіосигналів в шахтних тунелях.

**Предметом дослідження** моделі, методи та програмні засоби при радіоплануванні, ідентифікації радіосигналу та його прийомі в умовах тунелів шахт.

**Методи дослідження:** при виконанні дисертаційної роботи були використані: методи теорії розповсюдження радіохвиль, методи математичного моделювання при обґрунтуванні моделей розповсюдження радіохвиль в різноманітних умовах, методи теоретичного та експериментального дослідження, комп'ютерне моделювання при вирішенні конкретних прикладних задач, зокрема, методи високопродуктивних обчислень.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано метод визначення відстані до місця розміщення радіоприймачів при вирішенні завдань радіопланування в тунелях шахт на основі використання математичної моделі енергії електромагнітного поля в точці, що є адитивною сумою енергій складових поля, які описують як процеси прямолінійного розповсюдження радіосигналів, так і ті, що виникають внаслідок дифракції та рефракції. Функції енергії в точці для складових, що входять в математичну модель, визначаються згідно існуючих класичних моделей розповсюдження радіохвиль. А загальна функція енергії поля в точці формується як адитивна сума функцій складових поля, де коефіцієнти налаштування визначаються методом найменших квадратів за експериментальними даними. В запропонованому методі ітераційний процес уточнення відстані між передавачем і приймачем реалізується за рахунок екстраполяції функції енергії поля на іншу відстань з урахуванням обмеження на мінімальну енергію сигналу відповідно чутливості радіоприймача, з подальшим експериментальним підтвердженням рівня енергії сигналу.

2. Удосконалено метод ідентифікації радіосигналів на основі критерію «збігу фазового портрету» при направленому переборі значення Допплерівського зміщення частоти. На відміну від існуючих, запропонований метод дозволяє програмно визначати Допплерівське зміщення частоти, що забезпечує селекцію свого радіосигналу, за рахунок чого досягається стійкий прийом сигналу, в тому числі і для випадку динамічних змін меж області розповсюдження.

3. Запропоновано математичну модель оцінки обчислювального навантаження адаптивного панорамного радіоприймача для умов роботи в тунелях шахт з урахуванням вимог щодо якості прийому радіосигналу у реальному часі. Розроблено GNUradio-модель та Simulink-модель радіоприймача, що пов'язують часові параметри радіосигналу з параметрами процесора. При дослідженні моделей в чисельних експериментах для тестових послідовностей радіосигналів, для яких

відношення сигнал/шум перевищує 5 dB, встановлено, що при використанні методу визначення «свого» радіосигналу кількість бітових помилок при прийомі зменшується в 10 і більше разів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблені методи та моделі дозволяють:

- спростити розрахунок пунктів розміщення радіоприймачів;
- підвищити якість прийому радіосигналу за рахунок зниження числа бітових помилок;
- спростити вибір мікропроцесора при проектуванні адаптивного панорамного радіоприймача для роботи в умовах тунелів шахт при створенні приймача, в якому реалізується запропонований метод ідентифікації радіосигналів, за рахунок чого забезпечується ефективний прийом.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором самостійно. В роботах, виконаних у співавторстві, автору належить: [1] – аналіз існуючих методів визначення частоти, моделювання процесу визначення частоти запропонованими методами; [2] – визначення частоти запропонованими методами; [4] – аналіз параметрів радіосигналу, розрахунки бітової похибки при різноманітних умовах застосування; [6] – проведення досліджень, моделювання радіоперешкод, аналіз результатів; [7] – проведення досліджень обробка отриманих даних; [8] – аналіз існуючих методів визначення частоти, обчислювання і практичні дослідження, що до параметрів ШПФ; [10] – моделювання умов використання, обчислювання бітової похибки, аналіз отриманих результатів; [11] – метод зменшення бітової похибки; [13] – моделювання умов роботи, практичні дослідження; [15] – метод зменшення бітової похибки, моделювання умов застосування, проведення дослідів, аналіз отриманих результатів; [16] – аналіз існуючих методів визначення частоти, моделювання процесу визначення частоти запропонованими методами; [17] – аналіз існуючих методів визначення частоти, моделювання процесу визначення частоти запропонованими методами.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях і семінарах:

1. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2017). Десята міжнародна науково-практична конференція. м. Київ, 2017 р.
2. XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine, 2017 р.
3. Шоста міжнародна наукова конференція «Моделювання-2018» ІІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ, 2018 р.
4. International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PICS&T-2108), Kharkov, Ukraine, 2018 р.
5. XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2018), Kyiv, Ukraine, 2018 р.
6. XXXVII Щорічна науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів ІІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ, 2019 р.
7. International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PICS&T-2109), Kharkov, Ukraine, 2019 р.

8. XXXVIII Щорічна науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів ІІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ, 2020 р

9. International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PICS&T-2020) 2020, Kharkov, Ukraine, 2020 р.

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи і її результати опубліковано в 17 наукових працях, з яких: 6 статей у наукових фахових видання, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на патент і 9 матеріалів і тез доповідей на наукових конференціях, 1 стаття в журналі, який індексований в міжнародній наукометричній базі SCOPUS, 3 – доповіді на науково-практичних конференціях індексованих в міжнародних наукометричних базах SCOPUS.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації 154 сторінки. Основний зміст роботи викладено на 125 сторінках (з них дві повністю зайнято ілюстраціями). Дисертація містить 58 рисунків, 2 таблиці. Список використаних джерел включає 126 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дослідження, встановлений зв'язок роботи з науково-прикладними програмами, планами і темами, сформульована мета роботи, основні напрями досліджень і методи їх вирішення. Надано опис об'єкту і предмету досліджень, викладені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про апробацію результатів роботи і публікації.

**У першому розділі** Проведено аналіз методів радіопланування і прийому радіосигналів в умовах тунелів шахт. Представлено характеристики радіоперешкод, характерних для тунелів шахт. Визначені особливості розповсюдження радіосигналів в тунелях шахт та встановлено, що:

- Відносна величина енергії прямолінійного розповсюдження радіосигналу значно зменшується з відстанню від передавача по відношенню до сумарної енергії сигналу в довільній з точок тунелю.
- Енергія сигналу в довільній з точок тунелю суттєво залежить від геометрії його поверхні.
- Підсумкове електромагнітне поле в тунелях шахт є суперпозицією складових поля, де вторинні джерела є основним фактором, що визначають його структуру та енергію сигналу в довільній з точок тунелю.
- Підсумкове електромагнітне поле в тунелях шахт має яскраво виражені максимуми і мінімуми, формування яких визначається зонами Френеля. Зони «загасання» в умовах тунелів розташовані на відстані, що кратна довжині хвилі радіосигналу  $\lambda$ .
- В формуванні електромагнітного поля у тунелях шахт слід враховувати складові, що виникають внаслідок Допплерівського частотного зсуву.

Внаслідок проведеного аналізу сформульовані науково-прикладні завдання і обґрунтовані напрями наукового дослідження, сформульована мета дисертаційної роботи, визначені задачі дослідження.

У другому розділі запропоновано метод визначення ефективної відстані між джерелом радіосигналу та приймачем, а саме якомога більшої відстані, при якій все ж забезпечується стійкий прийом радіосигналу.

В запропонованому методі пошук відстані здійснюється в ітераціях, де кожне наступне значення визначається на основі екстраполяції значень енергії поля в точці, отриманих на основі пропонованої адитивної моделі.

Величину енергії поля в точці тунелю можна отримати на основі математичної моделі розповсюдження електромагнітного поля. Проте у випадку тунелів шахт це важко реалізувати, оскільки геометрія поверхні тунелів не є однорідною і може змінюватися в часі. Тому для визначення енергії в точках простору тунелів шахт пропонується використовувати наближену функцію, отриману на основі апроксимації вимірних значень енергії в точці на періоді функціями, що є рішеннями ряду досліджених класичних варіантів розповсюдження електромагнітного поля, де слід враховувати особливості розповсюдження радіосигналів в тунелях шахт.

Визначено, що на формування електромагнітної енергії в точках тунелів шахт суттєвий вплив мають наступні типи розповсюдження, створені первинним джерелом, для кожного з яких відображено загальні залежності, на основі яких обчислюється енергія поля в довільній з точок:

- $\Pi_1$  – електромагнітне поле, що створено первинним джерелом;

$$\Pi = \frac{1}{\varepsilon R} p e^{ikR}$$

- $\Pi_2$  – від гладкої поверхні;

$$\Pi = \frac{1}{2} \left\{ \frac{e^{iR_1 k}}{R_1} + \frac{e^{iR_2 k}}{R_2} + (f - 1) \frac{e^{iR_2 k}}{R_2} \right\}$$

- $\Pi_3$  – електромагнітне поле, що створюється поверхнею яка обмежує об'єм

$$\Pi(R) = \int P \frac{e^{-ikr}}{r} dV' + \frac{1}{4\pi} \int \left\{ \frac{\partial \Pi}{\partial n} \frac{e^{-ikr}}{r} - \Pi \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{-ikr}}{r} \right\} dS'$$

- $\Pi_4$  – дифракція на півплощині

$$\Pi(C) = \frac{(-i)}{2\pi} p \frac{e^{ikD}}{D} \{F(u_2) - F(-u_1)\} \{F(v_2) - F(-v_1)\}$$

- $\Pi_5$  – прямолінійне розповсюдженням

$$\Pi(R) = -\frac{ikp}{2\pi} \int \frac{p_0 e^{ik(r+p)}}{p rp} dS'$$



- $\Pi_6$  – проходження через перешкоду з отвором

$$\Pi(C) = \frac{(-i)}{2} p \frac{e^{ikD}}{D} \{F(u_2) - F(-u_1)\} \{F(v_2) - F(-v_1)\}$$

- $\Pi_7$  – розповсюдження у вільному просторі

$$\Pi(R) = \frac{1}{\varepsilon} \int_V \frac{P(R')}{r} e^{ikr} + \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ \frac{e^{ikr}}{r} \frac{\partial \Pi(R')}{\partial n} - \frac{\partial e^{ikr/r}}{\partial n} \Pi(R') \right\} dS'$$

- $\Pi_8$  – розповсюдження у неоднорідному середовищі

$$\begin{aligned} \Pi(R) = & -\frac{1}{4\pi} \int U(R') v(R, R') dV' + \\ & + \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ v(R, R') \frac{\partial u(R')}{\partial n} - u(R') \frac{\partial v(R, R')}{\partial n} \right\} dS' + \\ & + \frac{1}{4\pi} \int_V u(R') (\nabla_{R'}^2 v(R, R') + k^2(R') v(R, R')) dV' \end{aligned}$$

Практичні випробування показали, що кожна з описаних окремих моделей не дозволяє коректно описати процес розповсюдження радіохвиль у тунелях шахт.

Комп'ютерне моделювання демонструє вплив зон Френеля на електромагнітне поле, що суттєво залежить від області розповсюдження. А при віддзеркалюванні сигналу від поверхонь тунелю створюється затримка сигналу і зміщення його частоти (Доплерівський ефект). Якісна картина перерозподілу енергії сигналу за наявності в тунелях шахт Доплерівського ефекту наведена на рисунок 1.

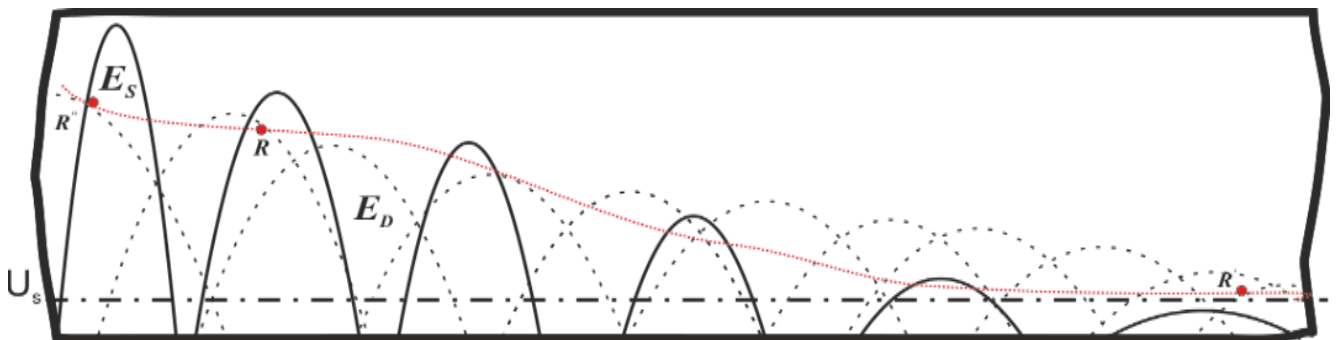


Рисунок 1 – Загальна модель розподілу енергії електромагнітного поля в тунелі шахти з урахуванням Доплерівського зсуву частоти і приклад екстраполяція значення функції енергії поля, що отримано в точці  $R$  в точки  $R'$  і  $R''$

Для отримання функції розподілу енергії сигналу в точках тунелю, що відображає якісну картину, представлену на рисунку 1, запропоновано використовувати функції розповсюдження радіосигналу, отримані для класичних варіантів розповсюдження у вигляді алгебраїчної суми енергій поля

$$E_{\text{рез}}(t) = \sum_{i=1}^N K_i G_i(t) \quad (1)$$

де  $K_i$  – коефіцієнт налаштування, який визначається по методу найменших квадратів. Він враховує взаємний вплив моделей розповсюдження в умовах тунелей шахти.

$G_i(t_i)$  – апроксимуючі функції, що є функціями розповсюдження електромагнітного поля та описуються представленими вище класичними моделями.

Функція  $E_{\text{рез}}(t)$  вибудовується на основі експериментальних даних в точці тунелю, шляхом виміру значень енергії ряду точок періоду сигналу (рисунок 2) на основі методу найменших квадратів

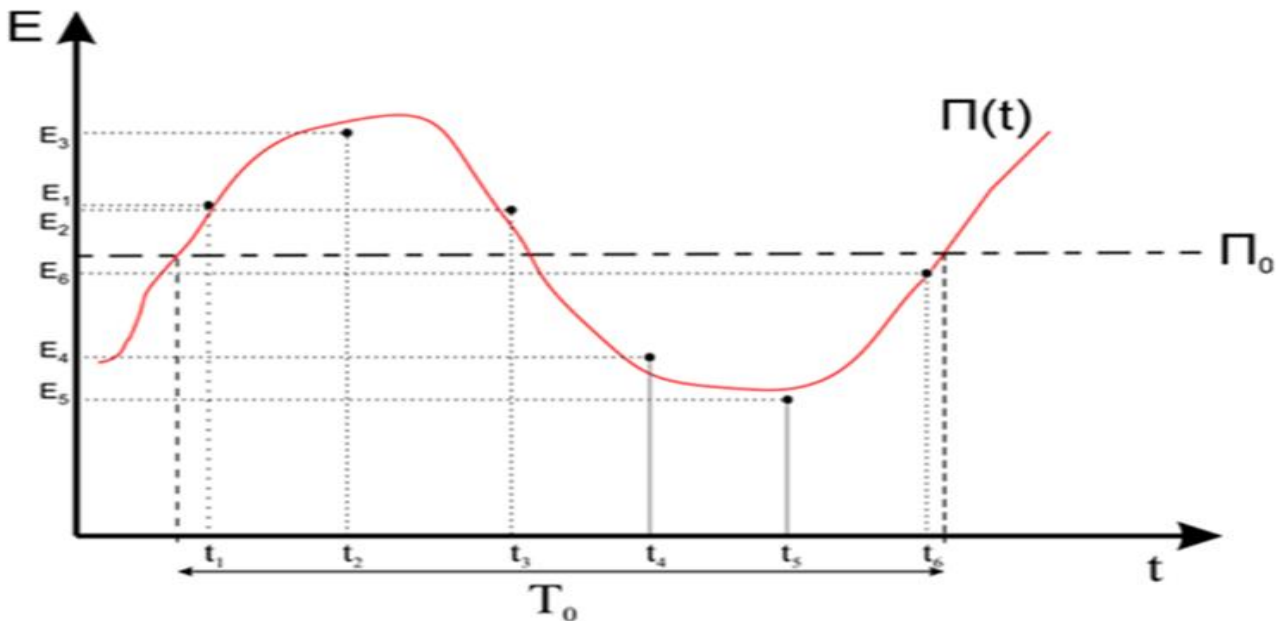


Рисунок 2 – Отримання значень величини енергії поля  $E_i$  за період сигналу

$$K = [\Pi^T * \Pi]^{-1} * \Pi^T * E$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \dots \\ K_N \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_M \end{bmatrix}$$

$$M \geq N$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} G_1(t_1) & \dots & G_N(t_1) \\ G_1(t_2) & \dots & G_N(t_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ G_1(t_M) & \dots & G_N(t_M) \end{bmatrix}$$

$E_i$  – отримані значення енергії поля в заданій точці шляхом вимірювання.

Оскільки функції  $G_i(t_i)$  описують процеси розповсюдження сигналу в довільній точці області розповсюдження, то на їх основі можна обчислити значення енергії сигналу в інших точках тунелю. Така екстраполяція дасть наближене значення енергії поля в наступній точці, яке можна уточнити експериментальними вимірюваннями. Даний процес уточнення відстані до місця розміщення приймача завершується при умовах, що енергія сигналу в обраній точці перевищує мінімальну енергію сигналу відповідно чутливості радіоприймача, а наступна точка знаходиться на близькій відстані від попередньої. Послідовність таких кроків визначає запропонований метод пошуку ефективної відстані від джерела радіосигналу до приймача.

**У третьому розділі запропоновано** метод ідентифікації радіосигналів на основі критерію «збігу фазового портрету».

Для прийому радіосигналу, з урахуванням невідомої величини Доплерівського зсуву частоти, необхідно провести селекцію корисного радіосигналу поміж різноманітними радіозавадами. Якщо радіозавада по потужності перевищує корисний радіосигнал, то радіоприймач буде в першу чергу приймати і обробляти радіозаваду, що приведе до затримки часу обробки корисної інформації і, як наслідок, до збільшення бітової помилки. Тобто необхідно розпізнавати свій радіосигнал до процесу його обробки.

У загальному вигляді корисний радіосигнал представимо у вигляді

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (2)$$

$$s(t) = A_0 A_m(t) \cos \left( \omega_0 t + \int_{t_0}^t \omega_m(v) dv + \varphi_m(t) + \varphi_0 \right) \quad (3)$$

де  $A_0$  – амплітуда сигналу,  $\omega_0$  – несуча кутова частота,  $\varphi_0$  – початкова фаза,

$A_m(t)$ ,  $\omega_m(t)$ ,  $\varphi_m(t)$  – закон амплітудної, частотної і фазової модуляції,  $n(t)$  – будь-яка радіоперешкода. У комплексному вигляді, без урахування радіозавад, радіосигнал має вигляд

$$s(t) = A(t) e^{j\psi(t)} \quad (4)$$

де  $\psi(t)$  – повна фаза.

Параметри сигналу на вході приймального пристрою:

- Потужність сигналу  $P(t) = s^2(t)$ ;
- Питома енергія сигналу  $E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt$ ;
- Тривалість сигналу  $T$  визначає інтервал часу, протягом якого сигнал існує (відмінний від нуля);
- Динамічний діапазон є відношення найбільшої миттєвої потужності сигналу до найменшої  $D = 10 \lg \frac{P_{max}}{P_{min}}$ ;

- Ширина спектра сигналу  $F$  – смуга частот, в межах якої зосереджена основна енергія сигналу;
- База сигналу є добутком тривалості сигналу на ширину його спектру  $B = \tau F_s$ ;
- Відношення сигнал/шум дорівнює відношенню потужності корисного сигналу до потужності шуму  $N = \frac{P_s}{P_n}$ ;
- Робоча (несуча) частота  $f_0$ , сигнали можуть бути одночастотні і багаточастотні;
- Займана смуга частот  $D_f = f_h - f_l$ , сигнал може бути вузькосмуговий і широкосмуговий;
- Нестабільність частоти  $\Delta f_0$ ;
- Тип модуляції.

Внаслідок обробки радіосигналу радіоприймачем отримуємо наступні параметри на виході приймача: амплітуду, фазу, тип модуляції, тривалість сигналу, спектральні характеристики. При спектральній обробці радіосигналу отримуємо спектральні характеристики: частотний спектр і фазовий спектр. На основі проведеного аналізу визначено, що найбільш інформативною є спектральна група параметрів, а саме фазовий спектр, так зване «фазове сузір'я».

Для ідентифікації радіосигналу пропонується представляти радіосигнал на вході радіоприймача у вигляді

$$a(t) = A(t) \cos \left( \omega t + \left[ \theta_0 + \varphi_1(t) + \sum_i \varphi_{2,i}(n_i) + \sum_j \varphi_{3,j}(k_j) \right] \right)$$

де до фази  $\varphi$  включені основна модуляція та паразитні мінімодуляції:

- $\theta_0$  – основна фазова модуляція ;
- $\varphi_1(t)$  – фазова модуляція часової затримки розповсюдження ;
- $\varphi_{2,i}(n_i)$  – паразитна фазова модуляція конструкції радіоприладу;
- гармонійні спотворення  $DAC$  (цифро-аналоговий перетворювач);
- спотворення шумами генератора  $LO$  (опорний генератор);
- спотворення через незбалансованість змішувачів;
- нелінійні спотворення  $PA$  (підсилювач потужності);
- затримки в антено-фідерному тракці;
- фазова модуляція віддзеркалювання при розповсюдженні  $\varphi_{3,j}(k_j)$ .

Все це накладає на радіосигнал свої неповторні особливості, властиві лише цьому радіопередавачу – формує «фазовий портрет».

Для отримання фазового спектру серед різних видів спектральних перетворень сигналів запропоновано використовувати перетворення Фур'є, що краще всього відповідає критеріям: кількість необхідних ітерацій та часу, для отримання спектральних характеристик з необхідною точністю; необхідний обчислювальний ресурс для виконання операцій; чутливість до зміни одного із параметрів радіосигналу. Ефективність такого підходу демонструється на рис. 3.

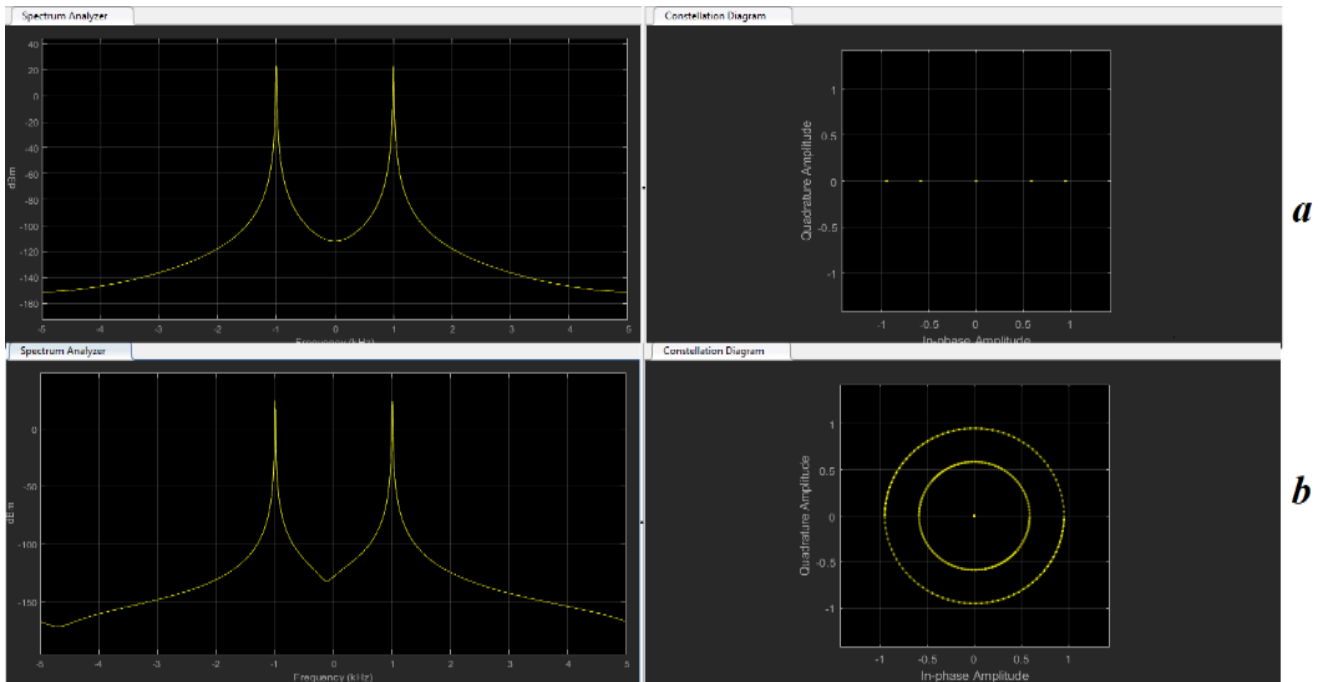


Рисунок 3 – Простий радіосигнал та його частотний і фазовий спектри: **a** – з частотою 1000 Гц; **b** – з частотою 1010 Гц

На ньому представлено два простих сигнали, що відрізняються зсувом частоти на 10 Гц. Візуально на частотному спектрі різниця не помітна, але її добре видно на фазовому спектрі.

Сигнал  $y(t)$  після фільтрації  $F$  і аналого-цифрового перетворення в  $A/D$  – перетворювачі представимо в дискретній формі як періодограму часового ряду

$$y[n\Delta] = s[n\Delta] + \gamma[n\Delta] \quad (5)$$

де  $\Delta = 1/f_s$  – період дискретизації,  $f_s$  – частота дискретизації по Найквісту,  $s[n\Delta]$  – гармонійний сигнал

$$s[n\Delta] = U_0 + U \cos(\omega[n]\Delta + \varphi) \quad (6)$$

де  $U_0$  – постійна складова,  $U$  – амплітуда,  $\varphi$  -початкова фаза.

При використанні дискретного перетворення Фур'є (ДПФ)

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-i2\pi kn/N} \quad (7)$$

отримуємо дискретний фазовий Фур'є-спектр

$$\Psi(k) = \bigcup_{n=0}^{N-1} X_{n,k} \quad (8)$$

$$X_{n,k} = \arctg \frac{\text{Im}[C_{n,k}]}{\text{Re}[C_{n,k}]}$$

де  $N$  – кількість точок ДПФ,  $X_{n,k}$  – значення фазового спектру у  $n$  точці  $k$  відліку. Процесор визначає відліки з максимальним значенням фази радіосигналу.

Задача процесу визначення «свого» радіосигналу, є знаходження таких значень фази, які відповідають фазовому портрету еталонного радіосигналу. В даному

випадку, задача ідентифікації подібна до вирішення задач синтезу адаптивного регулювання і зводиться до побудови кінцево-збіжних алгоритмів.

Запропонований метод ідентифікації «свого» радіосигналу базується на вищезгаданих теоретичних засадах і заснований на рішенні рекурентних нерівностей, які в евклідовому просторі  $\{\beta\}$  мають вигляд

$$\eta[n] = |(a[n], \beta[n]) + \eta[n]| \leq \varepsilon \quad (9)$$

де  $n=0,1,2,\dots$  - число вибірки із множини  $A$ , котре оцінюється,  $\beta$ - ваговий вектор,  $\beta[n] \in \{\beta\}$ ,  $(a[n], \beta[n])$  є скалярним добутком векторів  $a$  і  $\beta$ ,  $\eta > 0$ ,  $\varepsilon > 0$  – дійсні числа.

Нерівності (9) при фіксованому  $n$  визначають зону (смугу) між двома паралельними площинами в просторі  $\{\beta\}$ . Смуги (9) є апріорно невідомими. Існує алгоритм («смуга»), який за розрахунковим значенням  $\beta[n]$  «відправляє» вектори  $a[n]$  в зону, визначену (9). Відповідно до дискретних значень  $a[n]$  виконується корекція значень вектора, наприклад, таких як

$$\beta[n] = \begin{cases} \beta[n-1], & \text{if } |\eta[n-1]| \leq \varepsilon \\ \beta[n-1] - \lambda[n-1]\eta[n-1]|a[n-1]|^{-2}a[n-1] & \text{інші} \end{cases} \quad (10)$$

Якщо нерівність (10) істинна, то вектор  $\beta[n]$  не змінюється, а інакше він проектується на площину  $(a[n], \beta[n]) + \eta[n] = 0$ , розташовану всередині смужки (9).

На основі використання запропонованого способу корекції значень вектора  $\beta[n]$ , представленого співвідношенням (10), вирішується нерівність

$$\left| \sum_i^n (\psi(i), \beta[i]) - \eta[k] \right| \leq \varepsilon$$

де

$$\eta[k] = |\Psi[k]|^2 - |\Psi[k-1]|^2 \quad (11)$$

Тут  $\Psi[k]$  є елементом із серії відліків послідовності фаз (точкою ШПФ) значення вектора налаштування

$$\beta[k] = e^{-\frac{2\pi kn}{N}} \quad (12)$$

$\varepsilon$  – досить мале значення.

Дія алгоритму «смуга» при використанні запропонованого способу корекції (10) показана на рисунку 4.

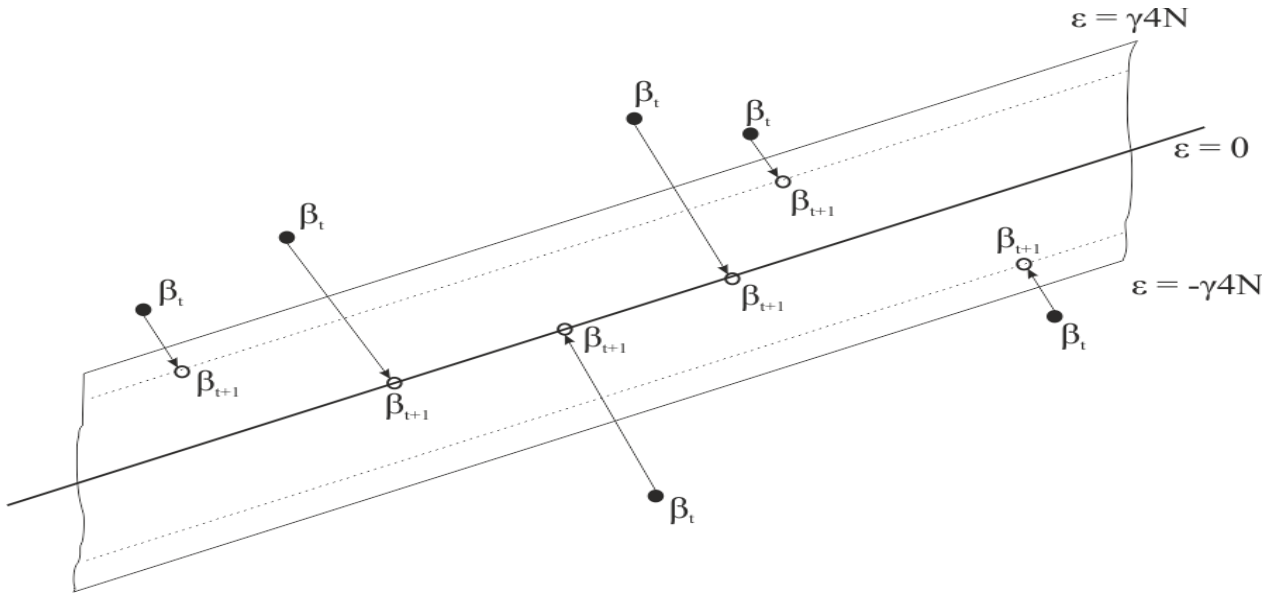


Рисунок 4 – Дія алгоритму "смуга"

Число  $\gamma$  задається з інтервалу  $0 < \lambda' \leq \lambda[k] \leq \lambda'' < 2$ , щоб задовольнити вимогу  $\beta[k] > 0$  в інтервалі  $1 \leq k \leq [(N-1)/2]$ , де значення фази визначається співвідношенням  $\varphi = N^{-1} \ln(\beta)$ .

Алгоритм визначення «свого» радіосигналу засновано на порівнянні еталонного цифрового зображення «фазового сузір'я» з «фазовим сузір'ям» прийнятого радіосигналу по одному з каналів радіоприймача.

$$\Psi \equiv \Psi(k) = \begin{cases} A_1(\Psi(k-1), 0) & \text{якщо } \eta(n, 0) < \varepsilon \\ A_2(\Psi(k-1), \lambda/8) & \text{якщо } \eta(n, \lambda/8) < \varepsilon \\ A_2 \Rightarrow A_1 & \text{якщо } \eta(n, 0) \text{ или } \eta(n, \lambda/8) > \varepsilon \end{cases}$$

Алгоритм ідентифікації передбачає послідовний аналіз подій:

- Центральний канал співпадає з основною полосою частот радіосигналу (подія  $A_1$ )

$$\begin{aligned} \eta(k, 0) &= |\Psi[k] - \Psi[k-1]|^2 = |A_1[k-1] - \Psi[k-1]|^2 = \\ &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (X_{n,k} - X_{n,k-1})^2} \leq \varepsilon \quad (13) \end{aligned}$$

$\eta(k, 0)$ - полоса ідентифікації

- Один з додаткових каналів с співпадає з основною полосою частот (подія  $A_2$ )

$$\eta(n, \lambda/8) < \varepsilon$$

- Ні один з каналів не співпадає з полосою радіосигналу

- довжина радіохвилі збільшується на заздалегідь обрану величину зсуву  $F_W \leq F_x \leq \lambda/8$ , де  $F_x$  – значення частоти, на величину якої зміщений другий канал;
- подія  $A_2$  стає подією  $A_1$  ;
- процес пошуку частоти триває.

Процес ідентифікації повторюється до тих пір, поки значення обчисленого фазового сузір'я сигналу  $\Psi(k)$  із заданою точністю співпадає зі значенням еталонного фазового сузір'я  $\Psi$  .

Критерій виявлення «свого» радіосигналу базується на порівнянні порогу  $h_0$  з відношенням правдоподібності

$$l = \frac{F(\eta|H_1)}{F(\eta|H_0)} \quad (14)$$

де  $H_1, H_0$  – гіпотези наявності і відсутності сигналу. При  $l > h_0$  приймається рішення про присутність сигналу, при  $l < h_0$  – про його відсутність.

Формується список отриманих параметрів, де шуканий параметр відповідає його максимальному значенню. Для його знаходження пропонується використовувати алгоритм на основі оцінки значень геш-функцій. Використання геш-функції значно пришвидшує пошук інтервалу, в межах якого знаходиться шукане значення фази. Необхідний інтервал фаз визначається функцією виду:

$$h(k) = \hat{l} \bmod M \quad (15)$$

Відповідно до (15) номер інтервалу  $h(k)$  обирається для шуканого значення співвідношення функцій правдоподібності  $\hat{l}$  з інтервалу  $M$  значень співвідношення функцій правдоподібності . Основними вимогами до функції (15) стають швидке обчислення та відсутність хибного визначення

**У четвертому розділі** запропоновано математичну модель оцінки обчислювального навантаження адаптивного панорамного радіоприймача для умов роботи в тунелях шахт з урахуванням вимог що до якості прийому радіосигналу у реальному часі, який програмно реалізовано по технології SDR у вигляді GNUradio-моделі та Simulink-моделі, запропоновано метод вибору обчислювача із існуючих типів мікропроцесорів

Для реалізації наведеного у третьому розділі алгоритму запропоновано використати адаптивний панорамний радіоприймач на засадах SDR технології.

SDR-радіопристрій – це пристрій в якому майже всі функціональні вузли (за винятком вихідного підсилювача потужності та вхідного широкосмугового високочастотного підсилювача) і процес обробки радіосигналу реалізується програмними методами. Це забезпечує мініатюризацію пристроїв при великій кількості функціональних можливостей.

Функціональна-схема сучасної реалізації запропонованого в роботі адаптивного панорамного SDR-приймача наведена на рисунку 5.



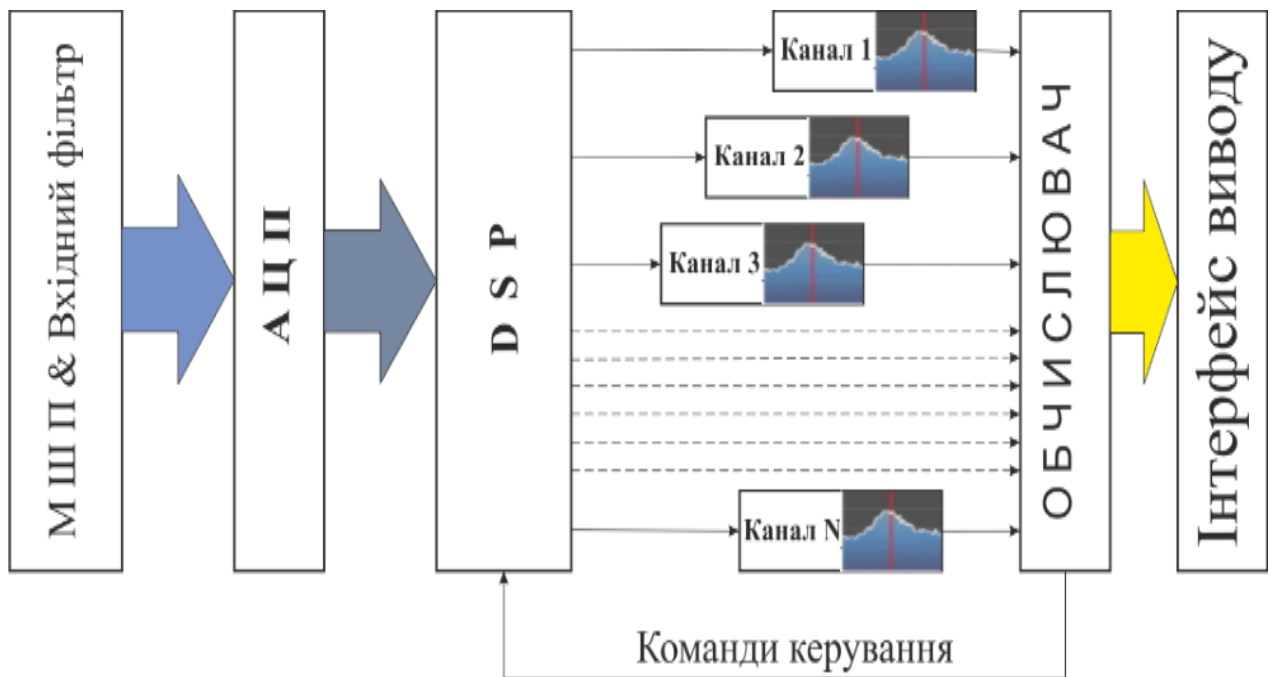


Рисунок 5 – Функціональна схема сучасної побудови SDR-приймача

Прийнятий радіосигнал на широкому частотному діапазоні  $\Delta F$  ( $\Delta F \equiv [\lambda_0/8]$ ) з антено-фільтрового блоку подається на АЦП, після чого основний канал може бути поділено на декілька додаткових радіоканалів обробки і подано на кінцевий пристрій обробки. Кількість додаткових каналів залежить від потужності обчислювача радіоприймача.

На основі запропонованого методу ідентифікації «свого» радіосигналу сформовано алгоритм функціонування адаптивного панорамного SDR-приймача

- при ініціалізації програмного забезпечення SDR-приймач створює два радіоканали: основний – займає полосу радіочастот згідно технічної документації; додатковий – розташовано на відстані від центральної частоти на частотному відрізку згідно умов  $\Delta F \equiv [\lambda_{v_2} \leq \lambda_s/8]$ , де  $\lambda_v$  – довжина хвилі радіосигналу на частоті додаткового радіоканалу в бік зменшення;
- прийом радіосигналу здійснюється основним і додатковим радіоканалами;
- після використання ШПФ отримуємо фазовий спектр;
- вираховуємо функцію кореляції по кожному із отриманих спектрів;
- вираховуємо функцію правдоподібності;
- вираховуємо співвідношення функцій правдоподібності (14);
- порівнюємо отримане співвідношення з порогом  $h_0$  та проводимо необхідний вибір згідно (15) із значень  $l$ ;
- у разі збігу результату з порогом  $h_0$  з урахуванням заданої похибки  $\sigma$ , алгоритм зупиняється, і додатковий канал, по котрому був збіг, стає основним;
- у разі коли збігу немає, центральним каналом стає додатковий радіоканал;
- алгоритм повторюється з початку для нового блоку інформації.

З метою оцінки можливостей створення адаптивного панорамного SDR-приймача, придатного для вирішення поставленої задачі, було вибрані наступні критерії: необхідний час для визначення фазового портрету радіосигналу,

обчислювальні можливості процесора SDR-приймача, температурний режим, час автономної роботи, можливості автономного джерела живлення.

Для оцінки часу визначення фазового портрету радіосигналу проведено аналізу тривалості пакету радіопротоколу передачі інформації. На рис. 6 наведено початкова частина кадру WiFi протоколу, який є типовим для побудови сучасних цифрових радіопротоколів передачі даних.

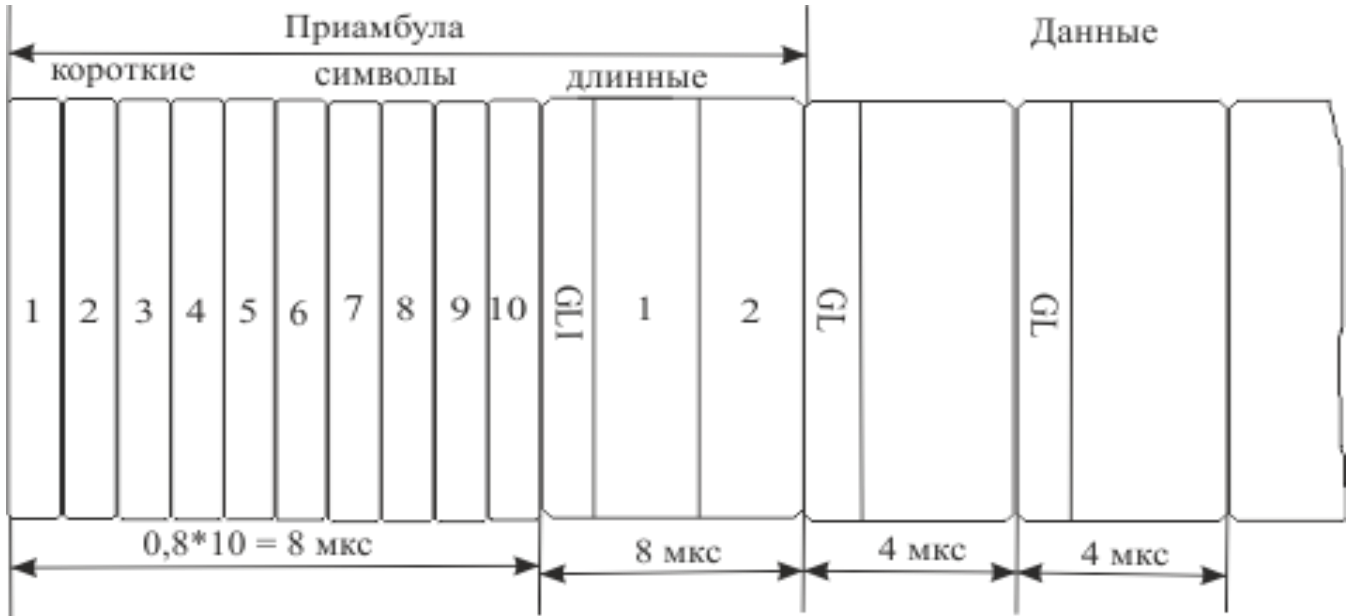


Рисунок 6 – Структура пакету передачі радіоданих

Для визначення фазового портрету радіосигналу бажано, щоб тривалість  $T_0$  обробки даних програмою не перевищувала тривалості одного-двох захисних символів на початку пакету радіосигналу. Тобто  $T_0 \leq 1,6$  мкс у даному випадку.

Математична модель розрахунку тривалості циклу  $T_{sft}$  знаходження фазового портрету радіосигналу у комп'ютерній програмі представлена функціональною залежністю

$$T_{sft}(k_A) = k_A(m\tau_{FFT} + \tau_A) \leq T_0 - (\tau_{in} + \tau_{out}) \quad (16)$$

де  $\tau_{in}$ ,  $\tau_{out}$  – тривалість алгоритмів вводу, виводу даних (за звичай відомі),  $\tau_{FFT}$  – тривалість алгоритму ШПФ (відома),  $m$  – кількість ітерацій ШПФ (задається користувачем),  $\tau_A$  – тривалість операції порівняння,  $k_A$  – кінцеве чисельне максимальне значення виконаного порівняння (перестановок) із загального числа можливих поєднань порівнянь  $A$  ( $1 \leq k_A \leq n$ ),  $n$  – кількість значень, що надійшли для операції порівняння, рівне можливому числу додаткових каналів,  $A = 0, 1, 2, \dots$ ,  $k_A$  – кількість операцій порівняння в алгоритмі

$$n = \frac{F_{\lambda/8}}{F_x}$$

$F_x$  – ширина додаткового каналу і зв'язана з параметром  $A$  через  $p_{n,k} = \frac{k_A}{n!}$  – імовірність виникнення події.

Типова модель обчислювача складається з трьох частин: інтерфейсу вводу даних, ядра обчислювача, інтерфейсу виводу. Як було наведено на рисунку 5, в випадку запропонованої схеми SDR-приймача, інтерфейси вводу-виводу є невід’ємними складовими частинами пристрою, процес обчислювань ШПФ є розпаралеленим, обчислювальні операції однотипні, а процес порівняння результатів обчислювання розпаралелених каналів буде займати основну частину часу роботи обчислювача.

Для визначення критичного навантаження на обчислювач адаптивного панорамного SDR-приймача застосовано правила динамічного програмування. При загальному аналізі отриманої множини алгоритмів, виділимо той, що буде займати найбільший час з загального часу виконання програми. Це буде алгоритм порівняння отриманих результатів з еталонним зразком. Спрощений варіант схеми цього алгоритму наведено на рисунку 7.

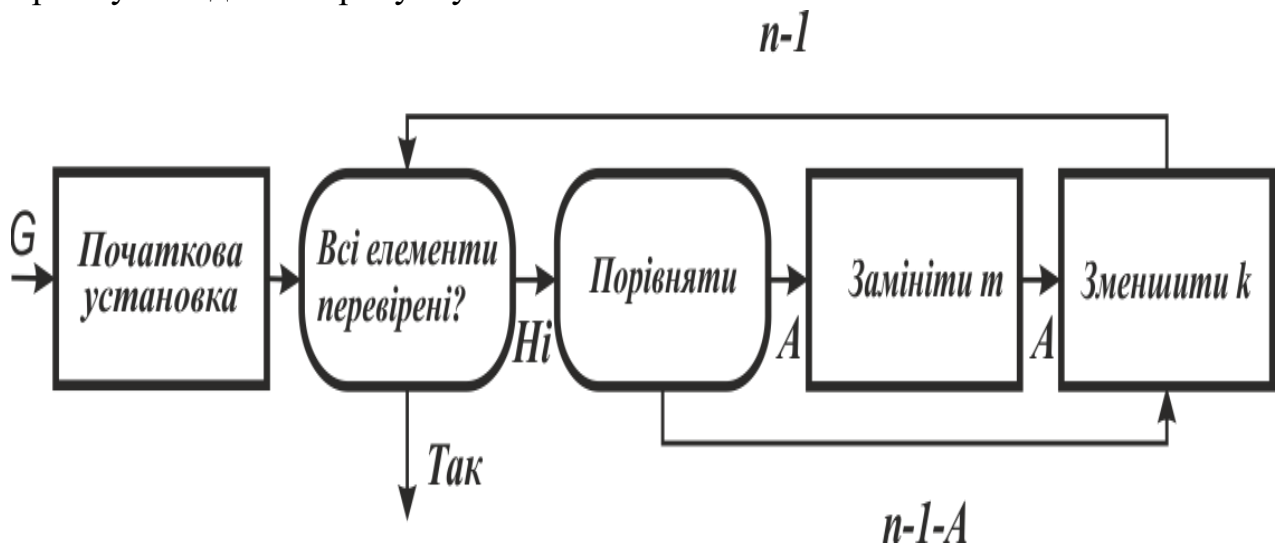


Рисунок 7 – Схема алгоритму

Де  $G$  – вхідні дані,  $n$  – загальна можлива кількість вхідних значень,  $m$  – значення, що максимально відповідає еталонному зразку,  $k$  – номер вхідного значення, що відповідає значенню  $m$ ,  $A$  – кількість ітерацій порівняння до моменту знаходження  $m$ .

В представленій схемі невідомо скільки разів  $A$  буде повторюватися виконання циклічного процесу порівняння. Від цього значення залежить час виконання алгоритму, а відповідно і навантаження на обчислювальний пристрій. При відомому значення часу виконання однієї операції порівняння, треба оцінити вірогідність випадку необхідного результату при заданій максимально допустимій кількості ітерацій  $A$  процесу порівняння, тобто  $A = k$ .

Імовірність виникнення події  $X[k] = m$  дорівнюється  $p_{nk} = \frac{k}{n!}$

Математичне очікування  $A$

$$ave A_n = \sum_k k p_{nk} \quad (18)$$

Дисперсія величини  $A$

$$var A_n = V_n = \sum_k k^2 p_{nk} - A_n^2 \quad (19)$$

Середнє квадратичне відхилення величини  $A$

$$\sigma_n = devA = \sqrt{V_n} \quad (20)$$

Використавши виробничу функцію  $G_n(z)$ , і задавшись умовами  $p_{1k} = \sigma_{0k}$ ,  $p_{nk} = 0$ , як що  $k < 0$  отримаємо

$$G_n(z) = \sum_k p_{nk} z^k = \frac{1}{z+n} \binom{z+n}{n} \quad (21)$$

Тоді  $p_{nk}$  можна виразити з допомогою чисел Стірлінга

$$p_{nk} = \left[ \begin{matrix} n \\ k+1 \end{matrix} \right] / n! \quad (22)$$

Задавши значення  $n$  та перебираючи варіанти  $k$ , можливо вирахувати оптимальне значення  $A$ , а отже і час виконання алгоритму в цілому.

$$\tau_A = n\tau \quad (23)$$

Враховуючи те, що інші програмні алгоритми відомі, легко визначити загальний час за який програмне забезпечення повинно виконувати необхідні функції.

Таким чином методика, створення програмного забезпечення адаптивного панорамного SDR-радіоприймача для прийому і визначення фазового портрету радіосигналу, з рахуванням факторів електроживлення, включає наступне:

- Оцінка джерела живлення с точки зору часу роботи пристрою і масо-габаритних розмірів;
- Оцінка максимального допустимого часу обробки інформації;
- Оцінка часу роботи програмного забезпечення по обробці даних;
- Оцінка потреб апаратного ресурсу обчислювача с урахування програмного забезпечення SDR и програми по обробці даних;
- Вибір апаратних параметрів обчислювача, а саме типу центрального процесора, типу і ємності пам'яті, типу портів вводу-виводу, тощо;
- Перевірка технічних параметрів обчислювача щодо споживанню струму, швидкості обчислення, тепловіддачі, та порівняння цих даних з характеристиками акумуляторної батареї;
- Якщо один із параметрів не відповідає вимогам, повернення до першого пункту, а інакше – кінець.

Запропонована математична модель оцінки обчислювальної складності процесу ідентифікації «свого» радіосигналу та зроблена оцінка можливості створення програмного забезпечення для мінікомп'ютера панорамного SDR-радіоприймача з урахуванням обчислювальної складності, яке забезпечує вимоги, щодо якості прийому радіосигналу у реальному часі, дію якої перевірено при створенні моделей панорамного адаптивного радіоприймача з використанням сучасних прикладних програмних пакетів проектування, модулювання і реалізації радіоприймачів по технології SDR як то GNUradio-моделі та Simulink-моделі і запропоновано варіант обчислювача, що дозволяє реалізувати метод ідентифікації радіосигналів та забезпечити їх ефективний прийом.

Прототип радіоприймача по технології SDR на основі GNUradio-моделі наведено на рисунку 8.

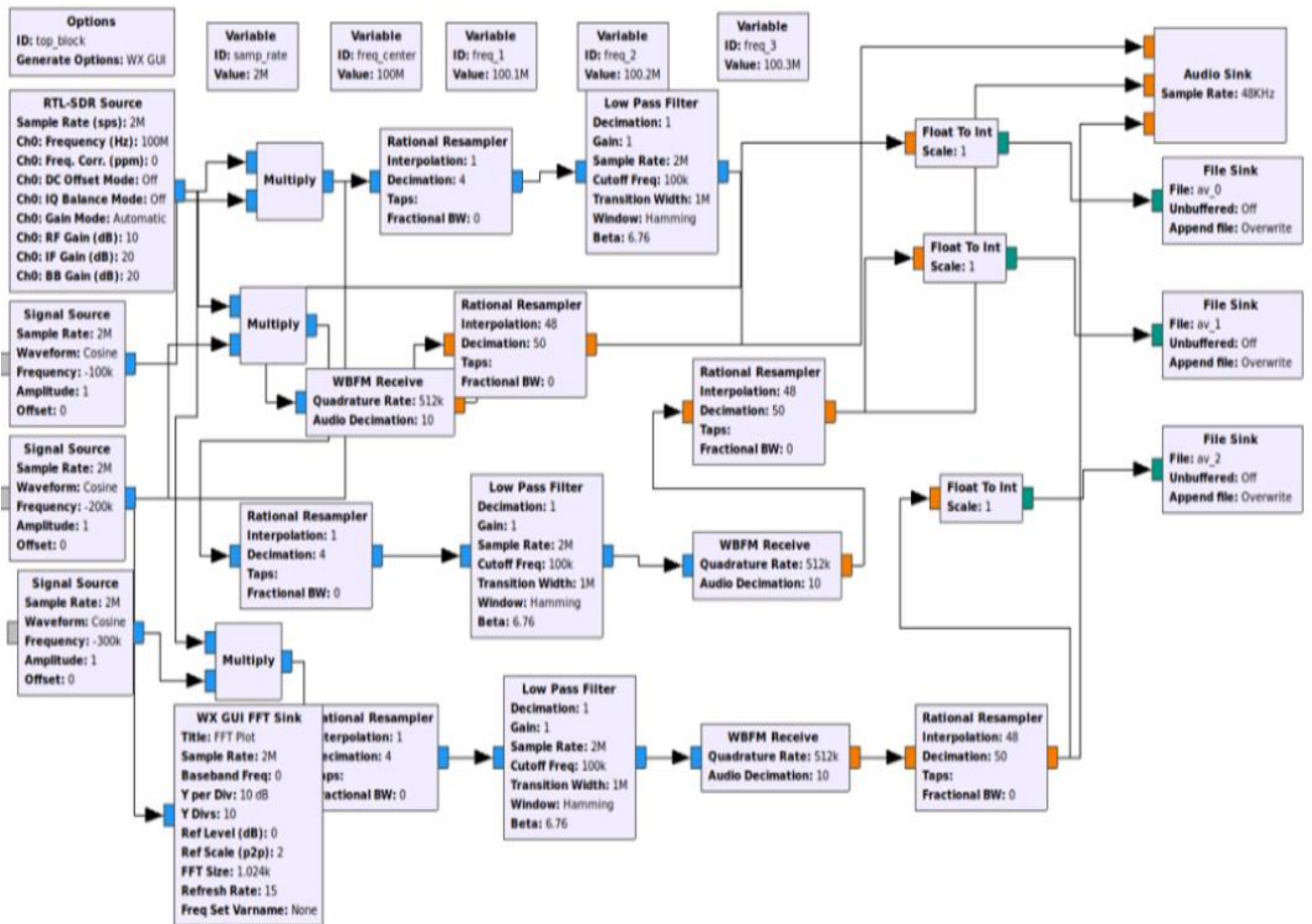


Рисунок – 8 GNUradio-модель адаптивного панорамного радіоприймача

У додатку наведено алгоритм ідентифікації радіосигналу, флюограф GNUradio-моделі і програмного рішення панорамного адаптивного радіоприймача розробленого по технології SDR, акт про впровадження результатів дисертаційної роботи – Акт № 03 від 20 березня 2020 року, у рамках НДР ТОВ «Дейта Експрес» пілотного проекту по впровадженню на підприємствах Метінвест та ДЕТЕК технологій мобільного зв'язку, позиціонування персоналу, транспортних засобів і застосування технологій IoT.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі були вирішені науково-прикладні завдання з розробки методів, моделей та програмних засобів для вирішення задач радіопланування, забезпечення ефективного прийому радіосигналів на основі ідентифікації «свого» радіосигналу та оцінки можливостей створення програмних засобів для багатоканального панорамного приймача на засадах SDR-технології, обчислювальна складність якого була б прийнятною для мінікомп'ютера панорамного SDR-приймача. Під час дослідження були отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Вперше запропоновано метод визначення місця розміщення радіоприймачів при вирішенні завдань радіо планування в тунелях шахт на основі використання математичної моделі енергії електромагнітного поля в точці, що є адитивною сумою енергій складових поля, які описують як процеси прямолінійного розповсюдження радіосигналів так і ті, що виникають в наслідок дифракції та рефракції. Функції

енергії в точці для складових, що входять в математичну модель, визначаються згідно існуючих класичних моделей розповсюдження радіохвиль. А загальна функція енергії поля в точці формується як адитивна сума функцій складових поля, де коефіцієнти налаштування визначаються методом найменших квадратів за експериментальними даними. В запропонованому методі ітераційний процес уточнення відстані між передавачем і приймачем реалізується за рахунок екстраполяції функції енергії поля на іншу відстань з урахуванням обмеження на мінімальну енергію сигналу відповідно чутливості радіоприймача, з подальшим експериментальним підтвердженням рівня енергії сигналу.

2. Удосконалено метод ідентифікації радіосигналів на основі критерію «збігу фазового портрету». На відміну від існуючих, запропонований метод дозволяє програмно визначати Допплерівське зміщення частоти, що забезпечує селекцію свого радіосигналу, за рахунок чого досягається стійкий прийом сигналу, в тому числі і для випадку динамічних змін границі області розповсюдження.

3. Запропоновано математичну модель оцінки обчислювального навантаження адаптивного панорамного радіоприймача для умов роботи в тунелях шахт з урахуванням вимог щодо якості прийому радіосигналу у реальному часі. Розроблено GNUradio-модель та Simulink-модель радіоприймача, що пов'язують часові параметри радіосигналу з параметрами процесора. При дослідженні моделей в чисельних експериментах для тестових послідовностей радіосигналів, для яких відношення сигнал/шум перевищує 5 dB, встановлено, що при використанні методу визначення «свого» радіосигналу кількість бітових помилок при прийомі зменшується в 10 і більше разів.

## СПИСОК ПРАЦЬ ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Березкін А.Л. Визначення несучої частоти радіосигналу за цифровими технологіями /Березкін А.Л., Кучеров Д.П. // Вісник інженерної академії України. – Київ. 2016. Вип. 4. – С. 80-85.
2. Березкин А.Л. Идентификационный подход к определению частоты радиосигнала/ Кучеров Д.П., Березкин А.Л.// Моделирование та інформаційні технології: Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. Київ. – 2017.Вип.78. – С. 88-94.
3. Березкін А.Л. Програмно визначаєме радіо – сучасні технології моделювання та конструювання радіопристроїв/ Березкін А.Л.// Моделирование та інформаційні технології: Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. Київ. – 2018. Вип. 83. – С. 86-94.
4. Березкін А.Л. Радіоканал LoRa в системі охоронної сигналізації. / Кучеров Д.П., Березкін А.Л. // Наукоємні технології № 3. НАУ України. Київ. – 2019. Вип 43. – С. 357 – 363.
5. Березкін А.Л. Модель формування електромагнітного поля в умовах замкнутого простору. / Березкін А.Л. // Електронне моделювання. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, Київ. – 2020. Т. 42, № 4. – С. 15-30.

6. Andrei Berezkin. Signals in the Receiving Channel for the LoRa System. / Dmytro Kucherov, Andrei Berezkin, Ludmila Onikienko, and Volodymyr Nakonechnyi // ISSN 2367-4512 Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies Volume 48. Springer. 2020. p. 423-445. (SCOPUS)  
<http://www.springer.com/series/15362>

### **Праці апробаційного характеру:**

7. Березкін А.Л. Обчислення центральної частоти модульованих за частотою сигналів. /Березкін А.Л., Кучеров Д.П.// Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2017). Десята міжнародна науково-практична конференція 16-17 травня 2017 року. НАУ України. Київ. – 2017 р. Збірник тез. – С. 75 – 77.
8. Berezkin A.L. Identification Approach for Determining Radio Signal Frequency/ Kucherov D.P., Berezkin A.L. // 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine pp. 379-382. (SCOPUS)
9. Березкин А.Л. Сучасні засоби комп'ютерного моделювання та створення радіосистем для IoT технологій. / Березкин А.Л. // Шоста міжнародна наукова конференція «Моделювання-2018» ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. м. Київ. – 2018 р. Збірник праць конференції. – С. 94-97.
10. Berezkin A.L. Detection of Signals from a LoRa System Under Interference Conditions. / Kucherov D.P., Berezkin A.L., Onikienko L.S.// 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T-2108), October 9-12, 2018, Kharkov, Ukraine, paper 138, pp. 437-441. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8632135> (SCOPUS)
11. Berezkin A.L. Protection of Information Networks Based on LoRa Technology/ Kucherov D.P., Berezkin A.L. // XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2018), Kyiv, Ukraine, November 27, 2018. pp.107-117. <http://ceur-ws.org/Vol-2318>. (SCOPUS)
12. Березкін А.Л. Виявлення сигналів системою LoRa в умовах перешкод. / Березкін А.Л. // XXXVII Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. м. Київ. – 2019 р. Збірник тез. – С. 26-28.
13. Berezkin A.L. Features of Signal Processing by Means of LoRa. / Kucherov D.P., Berezkin A.L., Sushchenko O.A. // Technologies 8 - 11 October, 2019 on the basis of Borys Grinchenko Kyiv University was held the International Scientific and Practical Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PIC S&T'2019). p. 19-24.
14. Березкін А.Л. Модель формування електромагнітного поля в умовах замкнутого простору та аналіз факторів, що впливають на його формування./ Березкін А.Л. // XXXVIII Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. м. Київ – 2020 р. Збірник тез – С. 52-54.
15. Berezkin A.L. Some Features of LoRa Technology Under Multi-Ray./ Kucherov D.P., Berezkin A.L.// Reception International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PICS&T-2020) 2020, Kharkov, Ukraine . p. 26

**Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

16. Березкін А. Л., Патент Спосіб оцінювання частоти гармонічного сигналу обчислювальними засобами./ Кучеров Д. П., Голенківська Т. І., Березкін А. Л., Костина О. М., Рудаков В. І., Станіщук А. Б., Твердохлібов В. В., Бичков А. М., Оникієнко Л. С., Пукас О. О.// Заявка u201707471 від 14.07.2017 Патент – 122473. Патент опубліковано 10.01.2018, бюл. № 1/2018.
17. Березкін А.Л. Патент Спосіб ітераційного визначення частоти гармонічного сигналу./ Кучеров Д.П., Березкін А.Л.// Заявка u201710491 від 30.10.2017 Патент – 123202. Патент опубліковано 12.02.2018, бюл. № 3/2018.

**АНОТАЦІЯ**

**Березкін А.Л. Методи та програмні засоби підвищення ефективності прийому радіосигналів в тунелях шахт.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова Національної академії наук України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню наукової задачі розробки методів визначення місць розміщення радіоприймачів при вирішенні завдань радіопланування та підвищенню якості прийому в умовах тунелів шахт.

Зроблено аналіз відомих моделей розповсюдження електромагнітного поля в різних умовах і запропонована математична модель розподілу енергії цього поля в умовах тунелів шахт. Визначені умови виникнення явища згасання радіосигналу та запропоновано метод вирішення цієї проблеми за рахунок використання Допплерівського частотного зсуву, що дозволяють підвищити якість прийому радіосигналу в умовах тунелів шахт.

Запропоновано метод ідентифікації радіосигналу в умовах невизначеності величини Допплерівського зсуву частоти на засадах збігу фазового сузір'я прийнятого радіосигналу з еталонним фазовим сузір'ям.

Запропоновано програмну реалізацію адаптивного панорамного радіоприймача на основі GNUradio-моделі та математичну модель оцінки обчислювального навантаження на мікропроцесор апаратної реалізації цього приймача на SDR технології.

**Ключові слова:** математична модель, радіопромінь, багатопроменеве розповсюдження, SDR-приймач, інтерференційні радіозавади, радіозв'язок, мінікомп'ютер.

**АННОТАЦИЯ**

**Березкин А.Л. Методы и программные средства повышения эффективности приема радиосигналов в туннелях шахт.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова Национальной академии наук Украины, Киев, 2021.



Диссертация посвящена решению научной задачи разработки методов определения мест размещения радиоприемников при решении задач радиопланирования и повышению качества приема радиосигнала в условиях тоннелей шахт.

Проведен анализ актуальности решения данной задачи. Сделана характеристика тоннелей шахт с точки зрения условий распространения электромагнитного поля. На практических примерах дано пояснение принципиального отличия возможностей использования радиоустройств на поверхности земли и в условиях шахт. На основании литературных публикаций рассмотрены модели распространения электромагнитного поля в условиях тоннелей шахт. На примере проведенных исследования в условиях шахт, локализованы физические явления возникающие при распространении поля, которые данные модели распространения не объясняют или не учитывают. На примере практических программ, используемых для радиопланирования, доведено, что данные программы малоэффективны при расчете электромагнитного поля в туннелях шахт.

Сделан анализ известных моделей распространения электромагнитного поля в различных условиях над земной поверхностью, доказана возможность применение данных моделей распространения в туннелях и предложена аддитивная математическая модель распределения энергии этого поля в условиях тоннелей шахт. Где степень влияния каждой из возможных составляющих энергии результирующего электромагнитного поля учитываются через коэффициенты настройки, который рассчитываются по методу наименьших квадратов на основании практических измерений в какой-либо точки туннеля шахты. Данная модель позволяет экстраполировать полученные в точке измерения результаты в любую другую точку данного туннеля, что сокращает упрощает расчет распространения электромагнитного поля и сокращает время радиопланирования туннеле.

Определены условия возникновения явления угасания радиосигнала как следствие задержки радиосигнала, которое возникает при многолучевом распространении в туннелях шахт. Предложен метод решения этой проблемы за счет использования Доплеровского частотного сдвига, что позволяет повысить качество приема радиосигнала в условиях тоннелей шахт.

Предложен метод идентификации радиосигнала в условиях неопределенности величины доплеровского смещения частоты на основе совпадения фазового созвездия принятого радиосигнала с эталонным фазовым созвездием. Метод основан на решении рекуррентных неравенств возникающих при решении задач синтеза адаптивного регулирования и сводится к построению конечно-сходимых алгоритмов.

Предложена программная реализация адаптивного панорамного радиоприемника на основе Simulink-модели и GNUradio-модели и математическая модель оценки вычислительной нагрузки на процессор аппаратной реализации этого приемника на SDR технологии. Данная модель значительно упрощает выбор микропроцессора для программной и аппаратной реализации адаптивного панорамного приемника для работы в условиях шахт, который способен улучшить качество приема радиосигнала на основе методов предложенных в данной диссертации.

**Ключевые слова:** математическая модель, радиолуч, многолучевое распространение, SDR-приемник, интерференционные радиопомехи, радиосвязь, миникомпьютер.

## ABSTRACT

**Berezkin A.L. Methods and software tools to increase the efficiency of radio signals in mine tunnels.** – As the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 01.05.02 – Mathematical modeling and computational methods. – Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of a scientific problem of development of methods of definition of places of placement of radio receivers at the decision of problems of radio planning and improvement of quality of reception in the conditions of tunnels of mines.

The analysis of known models of electromagnetic field propagation in different conditions is made and the mathematical model of energy distribution of this field in the conditions of mine tunnels is offered. The conditions of occurrence of the phenomenon of radio signal attenuation are determined and the method of solving this problem due to the use of Doppler frequency shift is offered, which allows to improve the quality of radio signal reception in the conditions of mine tunnels.

A method for identifying a radio signal under conditions of uncertainty in the magnitude of the Doppler frequency shift based on the coincidence of the phase constellation of the received radio signal with the reference phase constellation is proposed.

A software implementation of an adaptive panoramic radio receiver based on the GNUradio model and a mathematical model for estimating the computational load on the microprocessor of the hardware implementation of this receiver on SDR technology are proposed.

**Keywords:** mathematical model, radio beam, multibeam propagation, SDR receiver, interference radio interference, radio communication, minicomputer.